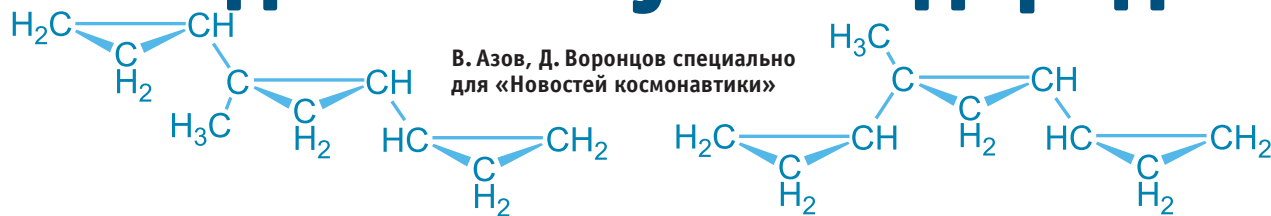


Последний бой углеводородов?



23 декабря 2007 г. исполнилось 25 лет со дня первого пуска ракеты 11A511Y2 («Союз-У2»). Носитель, стартовавший с космодрома Байконур, вывел на орбиту спутник «Космос-1425» (КА видовой разведки «Зенит-бУ»). Казалось бы – рядовой, даже рутинный запуск, если бы не одно «но». В баки ракеты, вместо всем привычного ракетного керосина РГ-1, было впервые заправлено новое горючее – «синтин». Этот синтетический углеводород, известный также как «циклин», до сего дня остается одной из загадок отечественной космонавтики. Попытку приоткрыть завесу таинственности и представляет собой эта статья.

Одним из главных и, заметим, весьма сложных вопросов при проектировании РН является выбор компонентов топлива. Несмотря на обилие химических веществ, пригодных для использования в качестве компонентов ракетного топлива (КРТ), далеко не все из них нашли применение в ракетной технике. Кроме высокой энергетики, КРТ должны отвечать множеству разнообразных, порой противоречивых, экономических, эксплуатационных, экологических и иных требований.

С точки зрения энергетики и экологической чистоты, топливная пара «жидкий кислород – жидкий водород» (ЖК–ЖВ) – вне конкуренции. О несомненных достоинствах этой «криогенной парочки» мы уже писали неоднократно. Однако ЖВ пока еще дорог и весьма «тяжел» в эксплуатации. В реальных условиях российские ракетно-космические специалисты, особенно эксплуатанты, предпочитают что-нибудь попроще.

По причине высокой токсичности и доровизны, похоже, последние дни доживает топливо «гептил – амил».

Из топлива «керосин – ЖК», кажется, выжато все, что можно, и дальнейших перспектив повышения энергетических возможностей ЖРД на этих компонентах не просматривается. Тем не менее в 1970–1980-х годах химии вроде бы нашли выход из «керосинового тупика». Разработав и передав в эксплуатацию несколько видов синтетического горючего, они дали «последний бой» наступающему водороду.

Казалось бы, что может быть проще керосина или бензина, встречающихся нам на каждом шагу, – самого обычного горючего для автомобилей, самолетов или просто средства для разжигания костров? Как ракетное горючее, в паре с ЖК керосин широко использовался для одной или нескольких ступеней многих РН: все семейство Р-7 (СССР/Россия), «Зенит» (СССР/Украина), «Энергия» (СССР), Saturn-I/IV/V, Delta I-III, Atlas (США), N1, N2, H1 (Япония). Китай также планирует использование керосина в перспективном семействе РН модульной конструкции.

Термином «керосин» обычно обозначаются продукты переработки нефти с широким диапазоном температуры кипения 200–300°C, представляющие собой смесь сотен или даже тысяч индивидуальных веществ. Основные компоненты смеси – углеводороды различных классов, включая ароматические, с числом атомов углерода от

8 до 17, хотя возможно присутствие малых количеств как более легких, так и более тяжелых компонентов. Допустимый состав смеси задается требованиями к таким качествам керосина, как температуры кипения, заморзания и воспламенения, давление пара, вязкость, наличие вредных примесей и др.

Керосиновые топлива включают в себя авиационное и ракетное горючее; при этом требования к каждой из групп значительно отличаются. Первые попытки применить авиационный керосин на ракетах в 1950-е годы показали необходимость создания специального ракетного керосина с более жесткими, а иногда и более специфическими ограничениями на некоторые параметры горючего. В итоге появились ракетные керосины РГ-1 в СССР и RP-1 в США, и поныне являющиеся основными углеводородными ракетными топливами в этих странах.

Каковы же специфические требования к ракетному керосину и чем он отличается от авиационного? В сравнении с авиационными топливами ТС-1 в России и JP-8 в США, применяемыми в гражданской авиации, РГ-1 и RP-1 имеют следующие свойства:

- ❶ Гораздо более узкий диапазон допустимых плотностей.
- ❷ Малое количество компонентов, приводящих к образованию нагара при регенеративном охлаждении, – олефинов и ароматических соединений.
- ❸ Низкое содержание серосодержащих компонентов, ведущих к образованию отложений на медных поверхностях при регенеративном охлаждении. Например, по сравнению со стандартным авиационным керосином JP-8 содержание серы в RP-1 ниже в ~20 раз.
- ❹ Желательно более узкий диапазон средней удельной теплоты образования – это важно для более точного соответствия удельного импульса I_{sp} расчетному.

Сравнительный анализ свойств ракетных керосинов РГ-1 и RP-1 (см. таблицу на с. 46) выявляет некоторые преимущества отечественного горючего: при почти равной теплоте сгорания оно примерно на 3% плотнее (0.832 против 0.806 при 22°C) и содержит серы на ~20% меньше, чем его американский аналог.

Недостатки керосинов (нестабильность свойств от партии к партии, недостаточные энергетические характеристики) в конце 1950-х – начале 1960-х годов обусловили интенсивные поиски их возможных заменителей, которые могли бы применяться без



▲ Старт одного из последних «Союзов-У2» 14.03.1995.

значительных изменений конструкции двигателя и ракеты. Были предложены синтетические углеводороды, содержащие 3- и 4-членные циклы, а именно производные циклопропана и циклобутана. Энергия, затрачиваемая на деформацию валентных углов атомов углерода при синтезе соединений с циклопропановыми или циклобутановыми фрагментами, «консервируется» в полученном соединении и выделяется в виде дополнительного тепла при сгорании вещества.

Необходимо отметить кардинальное отличие синтетического углеводородного горючего (УВГ) от синтетического жидкого топлива (СЖТ), которое, например, в значительных количествах производилось в Германии в годы Второй мировой войны. Фракции СЖТ представляют собой смесь углеводородов, по свойствам сходных с соответствующими фракциями перегонки нефти, такими как керосин, бензин или дизельное топливо. Высокоэнергетические ракетные УВГ – индивидуальные вещества, получаемые в результате последовательности химических реакций из простых органических соединений, таких как этилен или пропилен, которые, в свою очередь, в зависимости от технологии могут быть получены из нефти, газа или даже растительных или животных продуктов.

В 1960-е годы в США было запатентовано довольно много соединений, содержащих циклопропановые фрагменты, однако дальше этого дело не пошло. Большинство из веществ не полностью удовлетворяли таким требованиям, как температура вспышки и температура кипения. Кроме того, стоимость синтетического горючего оказалась чрезмерной.

Освоение в США водорода и создание такого выдающегося двигателя, как RL10, практически поставило крест на дальнейших исследованиях высокоэнергетических УВГ в качестве перспективных ракетных топлив, хотя некоторые возможности продолжают рассматриваться и сейчас. В настоящее время синтетические углеводороды или их смеси (например, RJ-4, RJ-5, RJ-6, JP-9 и JP-10) применяются в США в качестве топлива для ракетных ракет*.

А что же в СССР? Еще в 1950-е годы было синтезировано углеводородное горючее, известное как «синтин», или «циклин». Долгое время в силу секретности о нем было мало что известно. Люди интересующиеся знали, что некоторые модификации РН «Союз-У», разгонный блок (РБ) «Д» и объединенная двигательная установка корабля «Буран» использовали это горючее – и только. Однако о химическом строении синтина и его свойствах можно было только догадываться. Только в начале нового века стала доступна определенная информация об этом ракетном горючем.

Синтин, или 1-метил-1,2-дициклопропилциклопропан, был синтезирован в Институте органической химии АН СССР. Опытное производство УВГ было начато в 1970-е годы на Салаватском нефтехимическом комбинате. А в 1983 г. было освоено и промышленное производство синтина, что позволило начать его эксплуатацию в качестве высокоэффективного ракетного горючего**.

Будучи, в отличие от керосина, индивидуальным веществом (формула $C_{10}H_{16}$, структура показана на рисунке в заголовке), синтин обладает высокой стабильностью характеристик. Кроме того, он имеет более высокую плотность и более низкую вязкость, нежели керосиновые горючие (см. таблицу). Превосходя РГ-1 на 2.2% по удельной теплоте сгорания, синтин обеспечивает рост удельного импульса тяги углеводородных ЖРД. Например, применение этого УВГ в двигателе 11Д58М позволило увеличить данный показатель почти на 10 единиц (с 352 до 361–362 сек).

Однако многостадийный процесс химического синтеза синтина и сравнительно небольшие объемы производства обусловили весьма высокую удельную стоимость этого безусловно уникального горючего. К сожалению, в силу известных причин в середине 1990-х годов производство синтина в России было практически прекращено, из-за чего, например, планировавшиеся на определенном этапе пуски пилотируемых «Союзов» из Плесецка стали невозможны. В результате основные усилия ракетчиков были направлены на применение новых форсированных двигателей (РН «Союз-2»), работающих на РГ-1.

Еще одной альтернативой классическому керосину является УВГ, относительно недавно ставшее известным под названием

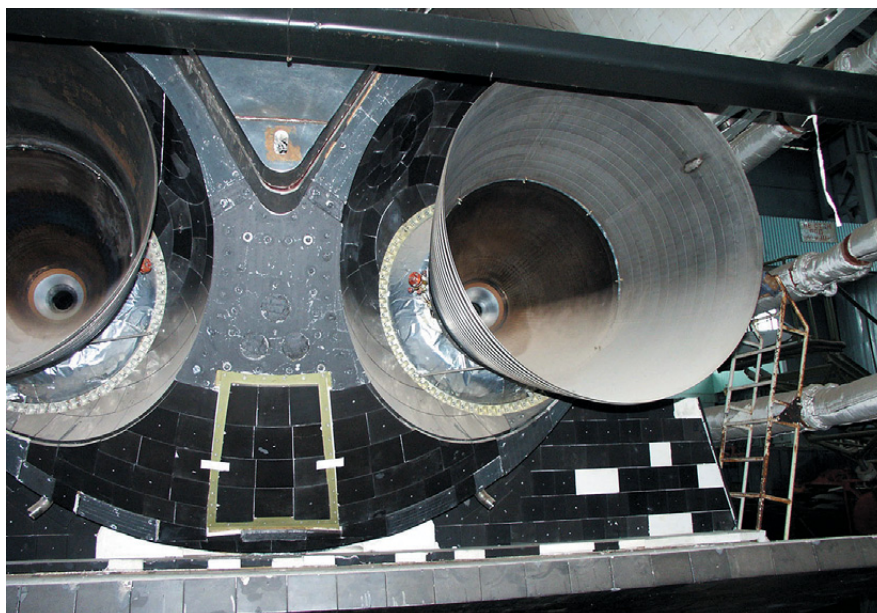


Фото с сайта www.buran.ru

▲ ОДУ «Бурана», работавшая на синтине

«боктан». Метод промышленного производства боктана – дициклобутила или бициклобутила (C_8H_{14}) – был разработан в СССР в результате совместных усилий Института нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева и Всесоюзного НИИ органического синтеза. В промышленности боктан получается путем двухстадийного синтеза из метиленициклобутана – побочного продукта промышленного производства изопрена. В итоге была создана промышленная установка с производительностью боктана до 20 т (!) в год, однако неизвестно, работает ли она в настоящее время. Как ракетное горючее он совсем немного уступает синтину (см. таблицу). Возможно, боктан мог бы заменять керосин на блоке «Д» при необходимости использовать УВГ с более высоким удельным импульсом тяги.

В отечественной литературе упоминался (без детального описания химической формулы и физико-химических свойств) еще и синтетический углеводород под названием «омар» как альтернативное экологически чистое горючее для разгонных блоков.

В последнее время появилось несколько ссылок о возможности применения в США квадрициклана, (C_7H_8 , тетрацикло[2.2.1.0.2,6.0.3,5]гептан). Особенности строения молекулы обуславливают очень высокую удельную теплоту образования данного углеводорода. Синтез квадрициклана несложен, однако он термически не совсем стабилен, а очень низкое содержание водорода вряд ли позволит применять его в качестве индивидуального горючего. Тем не менее он может использоваться как высокоэнергетическая присадка к другим топливам.

Итак, что мы имеем в «сухом остатке»? Синтетические УВГ в сравнении с керосинами могут обеспечить несколько процентов прироста массы ПГ. Однако их широкое применение сдерживается высокой стоимостью

производства. И хотя совершенствование технологии синтеза и увеличение объемов производства могут обеспечить некоторое снижение стоимости, по мнению авторов, применение синтетических УВГ, видимо, ограничится верхними ступенями РН и космическими РБ, да и то в случае специальных миссий: при необходимости разового увеличения грузоподъемности РН можно заменить керосин на более высокоэнергетичное синтетическое УВГ.

Применение других УВГ, например сжиженного природного газа (жидкого метана) (НК № 17/18, 1998, с. 42-44) или этилового спирта (который хоть и не является УВГ, но очень схож с ними по свойствам; НК № 4, 2006, с. 34-35), тоже не представляет каких-либо непреодолимых технических проблем. Однако в настоящее время перспективы этих компонентов выглядят неопределенными в силу отсутствия существенных преимуществ по энергетике и эксплуатационным качествам перед «традиционным» керосином.

Самому же керосину, как и другим УВГ, несмотря на удовлетворительные эксплуатационные качества, присущи и некоторые недостатки. Они обладают посредственной охлаждающей способностью. А при повышении давления и температуры в камере сгорания или газогенераторе УВГ разлагаются с выделением твердой фазы (сажа), что обостряет проблему охлаждения. Данная задача особенно актуальна для ЖРД многократного применения. Определенные технические трудности связаны и с организацией зажигания топлива «ЖК – керосин».

Стоит отметить и проблему возникновения высокочастотных колебаний***, которая на двигателях с высокой энергонапряженностью не решена до сих пор.

Хотя в керосине, как и в синтетических УВГ, «проще утонуть, чем отравиться», все же его экологическая чистота весьма условна.

* Здесь во главу угла поставлены не высокая «энергетика», а желание добиться наиболее высокой плотности и максимально низкой температуры замерзания.

** Опытная эксплуатация началась в 1975 г. (?)

*** В первом приближении одна из причин возникновения таких колебаний – большая (более чем 150°C) разница температур компонентов топлива, поступающих в камеру сгорания или газогенератор.

Сравнение термохимических свойств различных углеводородных ракетных топлив

УВГ/Параметр	РГ-1	РР-1	Синтин	Боктан ⁴	Квадрициклан
Формула	C _{12,3} H _{23,9} ¹	C _{11,7} H _{22,8} ¹	C ₁₀ H ₁₆	C ₈ H ₁₄	C ₇ H ₈
Соотношение Н/С	1.943	1.948	1.6	1.75	1.143
Диапазон температур кипения, °С	195–275	175–275	158	136	108
Температура замерзания, °С	-47	-49	-	-	-46.1
Температура воспламенения, °С	71	68	-	-	-
Удельная теплота образования, ² кДж/кг	-1810	-1750	980	100–500	3280
Удельная теплота сгорания, ² кДж/кг	43170	43380	44130	44110–44510	43740
Теплота сгорания ² с учетом массы O ₂ , кДж/кг	9440	9480	10290	10160–10260	10600
Плотность [22°С], г/мл	0.832	0.806	0.851	0.828	0.88
Содержание серы, частей на миллион	16	20	-	-	-

¹ Усредненное значение.

² Удельная теплота сгорания приведена для реакции C_nH_{2m(x)} + (2n+m)O₂(г) → nCO₂(г) + mH₂O(г) при нормальных условиях (P = 1 атм, T = 25°С).

³ Удельная теплота образования указана для жидких веществ при нормальных условиях (P = 1 атм, T = 25°С).

⁴ Оценочные данные.

Например, исследования зон падения ступеней «гептиловых» ракет, стартующих из Плесеца, проведенные Архангельским государственным техническим университетом по заказу МО, не выявили какого-либо четкого влияния гептила на состояние здоровья местного населения. По словам Константина Боголицына, доктора химических наук, профессора, заведующего кафедрой теоретической и прикладной химии АГТУ, ухудшение качества и продолжительности жизни местного населения напрямую с воздействием поблизости вредных веществ не связано.

«До сих пор не было проведено ни одного биологического исследования на предмет обнаружения, допустим, в крови содержания вредных веществ, образовавшихся из-за гептиловых составляющих. Поэтому уверенно утверждать, что он явно сокращает жизнь, невозможно, – заявил Боголицын. По его мнению, переход на керосиновое горючее не является панацеей: «И здесь есть свои подводные камни. Действие [ракетного керосина] на среду... неизвестно. Вот сейчас мы отследим то, как ведут себя продукты распада гептила в условиях болота и торфа, распространяются они или наоборот, абсорбируются. Разработаем методы воздействия. А вдруг окажется, что составляющие керосина со временем оказывают больший вред на окружающую среду? В общем, сейчас это одна из актуальнейших проблем, требующая глубокого комплексного исследования».

Очевидно, что долгохраняемые компоненты типа АТ и НДМГ будут постепенно «выводиться» из эксплуатации, в первую очередь, в силу экологических причин*, и область их применения ограничится КА и разгонными блоками. В ближайшие десятилетия в качестве основных, вероятно, будут доминировать такие компоненты, как жидкий кислород, керосин и другое углеводородное горючее, в том числе синтетическое, а позже и жидкий водород.

В целом можно отметить, что УВГ предпочтительны для миссий с невысокой энергетикой (выведение КА на низкие околоземные орбиты), при отсутствии готовых водородных ЖРД, неразвитости «водородной инфраструктуры», и на первых ступенях РН.

Радикально улучшить энергетику носителей можно только при использовании жидкого водорода. Преимущества последнего перед УВГ возрастают с увеличением

размерности РН или с ростом характеристической скорости, потребной для выполнения целевой задачи.

Между тем после выхода публикации «И снова о водороде» (НК № 10, 2007, с. 51–53) авторы статьи получили несколько телефонных звонков и электронных сообщений от читателей НК. Любопытно, что сторонников водорода среди них не было. Очевидно, последний и так все ясно. Читатели, обратившиеся к нам, восприняли выводы публикации как излишне категоричные. Более того, один из них (к сожалению, аноним) в довольно эмоциональной форме упрекнул авторов в попытке «провести водородную диверсию» в России, которая, по его словам, является бесспорным лидером в создании углеводородных ЖРД (с чем собственно мы вполне согласны) и не нуждается ни в каком водороде, поскольку керосина вполне достаточно и в настоящем и в обозримой перспективе.

Увы, «последний бой» углеводородами проигран. «Союз-У2», единственная советская (а потом и российская) РН на синтине, довольно быстро сошла со сцены. С помощью этой РН с космодрома Байконур и Плесецк менее чем за 13 лет эксплуатации на орбиту выводились ТК «Прогресс» и «Прогресс-М», ПКК «Союз-Т» и «Союз-ТМ», КА «Орлец-1» и «Гамма», а также отдельные экземпляры КА «Зенит-6У»... Последний, семьдесят первый пуск ракеты с космическим кораблем «Союз ТМ-22» состоялся 3 сентября 1995 г. После этого, ввиду нерентабельности производства синтина в рыночных условиях и его чрезвычайно высокой стоимости, эксплуатация «циклиновых» ракет в России была прекращена. Использование циклина позволило на две-три сотни килограммов поднять грузоподъемность носителя (7348 кг при запуске «Прогресс М-18» 22.05.1993) и только.

Интересно отметить, что многие страны (в том числе не являющиеся лидерами ракетных технологий, например Китай и Япония) предпочли использовать на верхних ступенях своих РН именно водород. Увы, Россия в «водородный клуб» входит пока условно (по «совокупности заслуг» в разработке блока «Ц» ракетно-космической системы «Энергия-Буран» и поставке водородных РБ в Индию)...

Список использованных источников имеется в редакции НК

«Полет» в структуре холдинга Центра Хруничева

И. Афанасьев.
«Новости космонавтики»

29 декабря генеральный директор ГКНПЦ имени М. В. Хруничева В. Е. Нестеров подписал приказ о создании в составе предприятия филиала – ПО «Полет». Юридическое оформление перехода омского авиационно-космического объединения «под крыло» Центра Хруничева закончено. С первых дней января предприятие приступило к выполнению общих производственных задач по выпуску ракетно-космической техники. Таким образом, выполнен Указ Президента РФ от 3 февраля 2007 г. № 127 «О федеральном государственном унитарном предприятии “ГКНПЦ имени М. В. Хруничева”» (НК № 4, 2007, с. 48–49).

По оценке губернатора Омской области Л. К. Полежаева, вхождение «Полета» в состав холдинга – лучший вариант из возможных. Правительство области целенаправленно вело поиск партнеров для омского гиганта, отдавая себе отчет в том, что в условиях мировой конъюнктуры предприятию самостоятельно не выжить.

При вхождении в холдинг «Полет» будет изготавливать комплектующие для РН «Протон-М» и «Рокот», создавать УРМы для РН «Ангара», производить малые КА на базе платформы «Яхта» и самолеты малой авиации «Аист Т-411».

К 2011 г. объем производства на ПО «Полет» увеличится как минимум в 2–3 раза, достигнув 3–4 млрд руб в год.

«Полет» наряду с красноярским НПО ПМ участвует в конкурсе на создание системы космического мониторинга для Газпрома. По данным советника гендиректора объединения Виталия Щетинина, омский проект системы уже направлен заказчику. Вывод на орбиту системы из 12 объектов омики предлагают провести за 1 млрд руб.

За основу взят малый (чуть более 30 кг) КА «Университетский». Для эффективного мониторинга газопроводов необходима группировка из 12–24 спутников.

По данным начальника управления оборонной промышленности, энергетики и связи минпрома Омской области В. Н. Лосья, предложение «полётцев» заинтересовало представителей Газпрома: «Есть правила эксплуатации газопроводов, которые включают постоянный мониторинг систем. Сейчас это делается с помощью авиации и мобильных наземных групп. Мониторинг из космоса точнее, ведется в круглосуточном режиме, а информация поступает мгновенно по цифровым каналам связи. Следовательно, реагирование будет оперативнее. Цена аварии несопоставима с ее предотвращением. Стоимость одного спутника – 40 млн руб, а при выведении он пойдет как дополнительный ПГ при пусках нашей РН «Космос-3М».

По материалам РИА «Новости» и газеты «Омская губерния»

* В свое время так и не начали эксплуатироваться «экзотические» топлива типа фтора и фторсодержащих окислителей и металлоидридного и борводородного горючего.